

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAKAOLİN VE SİLİS DUMANI İÇEREN HARÇ
VE BETONLARIN ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Yusuf HAMALI**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

**METAKAOLİN VE SİLİS DUMANI İÇEREN HARÇ VE
BETONLARIN ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Yusuf HAMALI
501041129**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. M. Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Recep İYİSAN
Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tez çalışmamın her aşamasında ilgisini, yardımını ve zamanını esirgemeyen değerli hocam Sn. Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmamda ve özellikle deneylerin yapılması sırasında emek ve desteğini esirgemeyen Sn. Dr. Özkan ŞENGÜL'e teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında kullanılan çimentoyu sağladığı için Nuh Çimento'ya, silis dumanını sağladığı için Elker'e, katkıyı sağladığı için YKS'ye ve Metakaolini sağladığı için PowerPozz'a teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında maddi, manevi varlıkları ile daima yanımda olan aileme teşekkür ederim.

HAZİRAN 2007

Yusuf HAMALI

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
1. GİRİŞ	1
2. KATKI MADDELERİ	3
2.1. Priz ve Sertleşmeyi Etkileyen Katkı Maddeleri:	4
2.1.1. Priz Hızlandırıcı Katkılar	4
2.1.2. Priz Geciktirici Katkılar	6
2.2. Taze Betonun Reolojik Özelliklerini Değiştiren Katkı Maddeleri	7
2.2.1. Su Azaltıcı (Akışkanlaştırıcı) Katkılar	7
2.2.2. Su Tutucu Katkılar	9
2.3. Kimyasal ve Fiziksel Etkilere Dayanıklılığı Artıran Katkı Maddeleri	9
2.4. Katkı Maddelerini Kullanırken Alınacak Önlemler	10
3. MİNERAL KATKILAR	11
3.1. Mineral Katkıların Çimento ve Beton İçerisinde Kullanılması	13
3.1.1. Doğal Mineral Katkılar	13
3.1.2. Yapay Mineral Katkılar	13
4. METAKAOLİN	18
4.1. Kaolin	18
4.2. Metakaolin	19
4.2.1. Metakaolinin kimyasal bileşimi	19
4.2.2. Çimento ve Beton İçerisinde Metakaolin	20
4.2.2.1. Metakaolinin Varlığının Taze Haldeki Etkileri	21
4.2.2.2. Metakaolin Varlığının İleri Yaştaki Etkileri	21
4.2.2.3. Metakaolin Karıştırılmış Pasta, Harç ve Betonların Yapıları	22
4.2.2.4. Metakaolinin Harç ve Beton Durabilitesine Etkisi	26
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	29
5.1. Kullanılan Malzemeler	29
5.1.1. Agregalar	29
5.1.2. Çimento ve Mineral Katkılar	30
5.1.3. Kimyasal Katkı	30
5.2. Deney Bileşimleri	30
5.3. Yapılan Deneyler	34
6. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ	35
6.1. Taze Beton ve Harç Deneyleri	35
6.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri	36
6.2.1. Silindir basınç deneyleri	36
6.2.2. Yarma deneyi	37
6.2.3. Klor geçirimsizliği deneyi	37
6.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri	38
6.3.1. Elektriksel özdirenç deneyi	38
6.3.2. Eğilme deneyi	40

6.3.3. Basınç deneyi	41
6.4. Değerlendirme	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ.....	45

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 Metakaolin eklenmiş çimentoların toplam porozitesi [10].....	25
Tablo 5.1 Elek Analizi Sonuçları.....	29
Tablo 5.2 Glenium 51 Teknik Özellikleri	30
Tablo 5.3 1m ³ yerleşmiş beton için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı = 0,35 için).....	32
Tablo 5.4 1m ³ yerleşmiş beton için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı = 0,45 için).....	32
Tablo 5.5 1m ³ yerleşmiş harç için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı = 0,35 için).....	33
Tablo 5.6 1m ³ yerleşmiş harç için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı = 0,45 için).....	33
Tablo 6.1 Taze beton deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için).....	35
Tablo 6.2 Taze beton deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için).....	35
Tablo 6.3 Taze harç deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için).....	35
Tablo 6.4 Taze harç deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için).....	35
Tablo 6.5 Elastisite modülleri.....	36
Tablo 6.6 28 günlük silindir numune basınç dayanımları.....	36
Tablo 6.7 Silindir numune yarma dayanımları.....	37
Tablo 6.8 Klor geçirimsizliği deneyi sonuçları.....	37
Tablo 6.9 Elektriksel özdirenç değerleri (su/bağlayıcı = 0,35 için), (kohm.cm)	39
Tablo 6.10 Elektriksel özdirenç değerleri (su/bağlayıcı = 0,45 için), (kohm.cm)	39
Tablo 6.11 Eğilme deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için), (MPa).....	40
Tablo 6.12 Eğilme deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için), (MPa).....	40
Tablo 6.13 Basınç deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için), (MPa).....	41
Tablo 6.14 Basınç deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için), (MPa).....	41

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 4.1	Kalsiyum hidroksit içeriği ile hidrasyon süresinin ilişkisi [12]..... 23
Şekil 5.1	Granülometri Eğrisi..... 31
Şekil 6.1	Metakaolin içeriğinin betonun klor geçirimliliğine etkisi..... 38
Şekil 6.2	Su/bağlayıcı oranı 0,35 için elektriksel özdirenç değerleri..... 39
Şekil 6.3	Su/bağlayıcı oranı 0,45 için elektriksel özdirenç değerleri..... 40

METAKAOLİN VE SİLİS DUMANI İÇEREN HARÇ VE BETONLARIN ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Metakaolin yüksek reaktifliğe sahip olan yüksek incelikte bir puzolanik malzemedir. Bu çalışmanın esas amacı, metakaolinin beton özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgili daha fazla veri elde etmektir. Aynı portland çimentosu ve metakaolinin kullanıldığı, 0,35 ve 0,45 su/bağlayıcı oranlarına sahip olan iki beton serisi hazırlanmıştır. Bu karışımlardaki çimento % 8 ve % 16 oranlarında metakaolin ile yer değiştirilmiştir. Daha fazla numune ve farklı yaşlarda test sonuçları elde edebilmek amacıyla bu betonların harç fazları da üretilmiştir. Metakaolin ile silis dumanının karşılaştırılabilmesi için aynı harç fazları silis dumanı ile de üretilmiştir. Beton numuneler üzerinde bazı mekanik testler ile klor geçirimsizliği testleri yapılmıştır. Basınç mukavemeti ve elektriksel özdirenç değerlerindeki gelişim harç numuneler üzerinden takip edilmiştir. Portland çimentosunu ile metakaolinin yer değiştirilmesi beton ve harcın basınç mukavemetini arttırmıştır. Metakaolin, betonun klor geçirimsizliğini belirgin bir biçimde azaltmıştır. % 16 metakaolin içeren betonların, ASTM C 1202'ye göre ihmal edilebilir derecedeki klor geçirimsizliği limitine çok yakın olduğu görülmüştür. Portland çimentosununun metakaolin ile yer değiştirilmesi, permeabilite karakteristiğinin göstergesi olan elektriksel özdirenç değerlerinde belirgin bir artışa yol açmıştır. Elde edilen elektriksel özdirenç değerleri klor geçirimsizliği değerlerini doğrulamaktadır.

PROPERTIES OF MORTARS AND CONCRETES WITH METAKAOLIN AND SILICA FUME

SUMMARY

Metakaolin is a highly reactive pozzolanic material with high fineness. The main objective of the work presented here was to provide more data on the effect of metakaolin on the properties of concrete tested. Two series of concrete mixtures with water/binder ratios of 0.35 and 0.45 were prepared using the same portland cement (OPC) and the same metakaolin. In these mixtures the cement was replaced by 8% and 16 % metakaolin. In order to obtain more specimens and carry out some of the testing at different ages, mortar phase of these concretes were also produced. For a comparison of metakaolin with silica fume, mortar mixtures were prepared also using the silica fume. Some mechanical tests and rapid chloride permeability tests were carried out on concrete specimens. Development of compressive strength and electrical resistivity were monitored on mortar specimens. Replacing ordinary portland cement by metakaolin increased the compressive strength of concrete and mortar. Metakaolin reduced the chloride permeability of concrete significantly and the permeability of the 16 % metakaolin concretes were very close to the negligible chloride permeability limit specified in ASTM C 1202. Replacement of portland cement by metakaolin or silica fume increased the electrical resistivity substantially which is an indication of reduced permeability characteristics. The resistivity test results obtained confirmed the chloride permeability test results.

1. GİRİŞ

Çimento üretimi, önemli CO₂ oluşum kaynaklarından birisidir ve 1 ton çimento üretilmesi yaklaşık olarak 1 ton CO₂'in atmosfere salınımına neden olur. Betonun çevreye olan zararının azaltılması, Portland çimentosunun puzolanik malzemelerle yer değiştirilmesi sonucu çimento tüketiminin azaltılması ile sağlanabilir. Betonun durabilitesinin iyileştirilmesi ve böylece servis ömrünün arttırılmasıyla da uzun dönemde beton ihtiyacı ve dolayısıyla betonun çevresel etkileri azalacaktır.

Puzolanik malzemelerin kullanılması, uzun dönem durabilitesi iyi olan yüksek performanslı betonların elde edilmesinde etkili bir yöntemdir. Bu malzemeler, bir miktar çimentonun yerine kullanıldıkları için çimento tüketimini azaltmakta, aynı zamanda da taze ve sertleşmiş özelliklerini de iyileştirmektedirler. Betonun kimyasal kompozisyonu, parçacık boyut dağılımı, inceliği ve puzolanik aktifliği betonun mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir.

Ortalama çapı 0,1-0,2 µm civarlarında olan silis dumanının tanecikleri normal Portland çimentosundan yaklaşık 100 kat küçüktür. Silis dumanı, bu yüksek inceliği nedeniyle uçucu kül ve cürufa kıyasla çok daha reaktiftir. Yüksek incelik ve reaktivliğine bağlı olarak silis dumanının beton mikro yapısına önemli etkisi olmaktadır. Yapılan çalışmalar, çimento pastasının boşluk yapısının silis dumanı eklenmesiyle iyileştirilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, silis dumanı kullanımı agrega-çimento pastası arayüzü de güçlendirmektedir. Metakaolinin beton içerisinde kullanımı son yıllarda artmaktadır. Metakaolin, yüksek saflıktaki kilin 600-850 °C'de kalsinasyonundan elde edilmektedir. Metakaolin, CH ile reaksiyona girebilecek aktif formda silis ve alumina içermektedir. Metakaolinin tanecik dağılımı ve puzolanik reaktivliği silis dumanı ile karşılaştırılabilir.

Literatürde silis dumanının etkisini inceleyen çok sayıda çalışma olmasına rağmen metakaolin ile ilgili çalışmalar kısıtlıdır. Bu çalışmanın esas amacı metakaolinin beton özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgili daha fazla veri elde etmektir. Bu amaç

doğrultusunda metakaolin içeren betonlar ve bu betonların harç fazları üretildi. Aynı şekilde bu harçların silis dumanı içeren karışımları da üretildi.

2. KATKI MADDELERİ

Çimentoların sahip oldukları özellikleri iyi yönde ve belirli bir ölçüde değiştirmek amacıyla, beton üretilirken karışıma az miktarda ilave edilen maddelere katkı maddeleri denilmektedir [1]. Katkı maddeleri çimento ağırlığının % 5'inden daha az olur. Miktar daha fazla olursa o maddeye bir bileşen gözüyle bakılır. Bunlar beton üretiminde karıştırma aşamasında katılırlar ve betonun taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerinin iyileştirilmesini sağlarlar [2].

Katkı maddeleri konusunda aşağıdaki temel bilgi ve değerlendirmeleri daima hatırlamak gerekir [2]:

1. Katkı maddeleri sihirli maddeler değildir. Kurallarına uygun olarak üretilmeyen kötü bir betonun katkı kullanılarak iyileştirilmesi imkansızdır.
2. Katkı maddeleri her çimento, her agrega türü ve granülometrisi için olumlu sonuç vermeyebilir. Belki katkı miktarını artırmak-azaltmak gerekebilir. Bu bakımdan katkının eldeki diğer malzemeye uyumu önceden deneyle araştırılmalıdır.
3. Pazarlayıcı tarafından önerilen yüzdeler her hale uygulanabilir değerler değildir. Katkı dozajı ön deneylerle araştırılmalıdır.
4. Katkı maddelerinin an fonksiyonları yanında daima ikincil etkileri de vardır. Bir özelliği düzeltirken başka bir özelliği bozmak olasıdır.
5. Bazı durumlarda birden fazla katkı maddesi birlikte kullanılır. Bunların uyumları, birbirlerinin etkilerini bozmadıkları kanıtlanmalıdır.

Bugün beton üretiminde pek çok çeşit katkı maddesi üretilmektedir. Bu katkı maddelerini oluşturdukları etkiler ve fonksiyonlar açısından sınıflandırmak en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Buna göre katkı maddelerini üç ana grupta incelemek mümkündür:

- Priz sürelerini ve sertleşme gelişimini etkileyen katkı maddeleri,
- Taze betonun reolojisini değiştiren katkı maddeleri,

- Kimyasal ve fiziksel etkilere dayanıklılığı arttıran katkı maddeleri.

Bu kısımda, yukarıdaki sınıflandırmaya göre katkı maddeleri incelenecektir. Bununla birlikte, katkı maddelerini kökenlerine göre de kimyasal ve mineral katkıları olarak ikiye ayırmak mümkündür. Bu çalışmada, bir mineral katkı olan metakaolinin daha detaylı incelenmesi ve diğer mineral katkılarıyla kıyaslanması amaçlandığı için, mineral katkıları takip eden bölümde daha detaylı incelenecektir.

2.1. Priz ve Sertleşmeyi Etkileyen Katkı Maddeleri:

Standartlara göre çimentoların bir saatten önce prize başlamaları, 10 saatten sonra priz olayının bitmesi istenmez. Ancak özel durumlarda priz başlama ve bitme sürelerinin değiştirilmesi, sertleşmenin de hızlandırılması istenebilir. Bu istek katkı maddeleri ile sağlanır [2]. Suda çözünen türde olan bu katkı maddelerine bir katalizör gözüyle bakmak mümkündür. Gerçekten bu sınıftaki maddeler, katalizörlerin şu genel özelliklerine sahip bulunmaktadır [1]:

- a) Az miktarda kullanıldıkları vakit etkili olabiliyor.
- b) Ancak meydana gelen reaksiyonlar üzerinde etki yapabiliyor.
- c) Reaksiyon sonundaki dengeyi değiştirmiyor.

Çimentoların katılaşması veya prizi anhidr elemanların çözünmesiyle başlamaktadır. İşte bu sınıfa giren katkı maddelerinin çözünmeyi kolaylaştırması halinde, başka bir deyimle çözünme olayının daha kısa bir zamanda olmasını sağladığı vakit, bu priz hızlandırıcı bir madde olmaktadır. Katkı maddesi çözünmeyi güçleştiriyorsa prizi geciktiren bir madde ile karşı karşıya bulunuyoruz demektir [1].

2.1.1. Priz Hızlandırıcı Katkıları

Prizi hızlandıran belli başlı maddeler şunlardır [1, 2]:

- Bütün klorürler (Ca, Na, Al, Fe, NH₄ klorürleri)
- Alkali hidroksitler (bazılar) (Na, K, NH₄ hidroksitleri)
- Alkali metal tuzları (Na₂CO₃ gibi)
- Karbonat, silikat, fluosilikat, alüminat ve boratlar (Na₂SiF₆ – sodyum fluosilikat gibi)
- Bazı ticari ürünlerin içerisinde kalsiyum nitrat (CaNO₃) ve kalsiyum nitrit'e, asit oksalik'e ve trietanolamin'e rastlanır.

Bu katkı maddeleri çimento ağırlığının % 0,5-5 miktarında yoğurma suyuna katılarak kullanılır [1, 2].

Prizi hızlandıran maddeler arasında en çok kullanılanı kalsiyum klorürdür. Bu maddenin çimento ağırlığının en fazla % 2'si oranında suyla karıştırılarak kullanılması önerilir. Kalsiyum klorür prizi hızlandırmakla veya başka bir deyişle priz süresini kısaltmakla beraber betonların başlangıçtaki mukavemetlerini artırır. Mukavemetteki artış ilk günlerde büyük iken zaman ilerledikçe azalır. En sonunda katkılı ve katkısız betonların mukavemetinde bir fark kalmaz. CaCl_2 'ün kullanılması halinde, hidratasyon olayı hızlandığından, hidratasyon ısısı belirgin bir artış gösterir. Bu özellikten dolayı soğuk havalarda beton dökümü bir miktar CaCl_2 kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu maddenin % 2 oranından fazla kullanılmasının şu sakıncaları vardır [1]:

- Betonun rötresini artırır.
- Betonun içinde bulunan donatıların korozyonuna neden olur. Bu zararlı etkisinden dolayı betonarme yapılarda CaCl_2 % 1 oranından daha fazla kullanılmamalıdır. Aynı nedenden bu katkı maddesinin önerilmeli beton yapılarda kullanımı yasaklanmıştır.
- CaCl_2 rutubet çekici bir maddedir. Bu bakımdan yapıların rutubet çekici olmasına neden olur.

Kalsiyum klorür, betonun sülfatlı suların etkisi altında bulunması ve bir alkali – agrega reaksiyonunun meydana gelme olasılığının varolması hallerinde kesinlikle kullanılmamalıdır [1].

Doğrudan hidroksitlerin kullanımı (KOH, NaOH, gibi) denetimi güç bir hızlanmaya yol açmaktadır. İlk gün zarfında hidratasyon ısısı yükselmekte ve priz süratle olmakta, daha sonra ise ısı hızlı bir biçimde azalmaktadır [2].

Ticari ürünler arasında daha çok sodyum alüminat kullanılmaktadır. Bu katkı, Portland ve Yüksek fırın cürufu çimentolarında uygun sonuç vermektedir. Prizi 8 dakikada sona erdirmek mümkün olabilir. Böyle bir betonu işlemek hemen hemen imkansızdır. Esasen sodyum alüminat da püskürtme betonlarda (shotcrete), galeri duvarlarını süratle örtmek, tıkamakta kullanılır. Su/çimento oranı fazlaştıkça

hızlandırma etkisi azalır. Alkali hızlandırıcılar son dayanımları önemli ölçüde düşürürler.

Hızlandırıcılar aşağıdaki çalışmalarda gerekli olmaktadır [2].

- Soğuk havalarda beton dökümü. CaCl_2 'ün burada donma noktasını indirmeye özelliği de etkinlik taşır.
- Çabuk kalıp alma durumu.
- Isıl işlem uygulanan prefabrikasyon işleri.
- Kür sürelerini azaltma durumları.
- Kalıplara gelen yanal basınç yüklerini azaltma.
- Tıkama, su sızdırmazlığını sağlama.
- Nemli galeri duvarlarına püskürtme beton uygulanması.

2.1.2. Priz Geciktirici Katkılar

Katkı maddeleri kullanılarak prizin geciktirilmesi iki şekilde gerçekleşmektedir. Birincisi anhidr elemanların çözülümünü güçleştirmektir. Bu, karışım suyuna yağlı kireç koymak suretiyle Ca miktarını artırarak yapılabilir. İkincisi, silikat taneleri üzerini az geçirimli bir tabaka ile kaplayarak anhidr elemanların su ile yaptıkları reaksiyonları azaltmaktır. Bu amaçla, muhtelif türde anyon ve katyon kullanılması mümkün ise de bunların beklenilmeyen aşırı etkilerinden dolayı bu yola gidilmemektedir. Bu nedenle iyonik olmayan maddelere, örneğin şekere yönelmekte ve bununla silikatların yüzeyinde az geçirimli bir tabaka oluşturulmaktadır [1].

Priz geciktirici belli başlı maddeler aşağıda gösterilmiştir [1, 2]:

- Lignosülfatlar (kalsiyum, sodyum, amonyum)
- Hidroksi karboksilik asit ve tuzları, nitrik asit (limon asidi)
- Karbonhidratlar, şekerler, nişasta, selüloz
- Fosforik asitler, fluorhidrik asit, hümik asit, fosfat ve florürler
- Oksitler, çinko ve kurşun oksit
- Gliserin
- Boraks
- Magnezyum tuzları

Bu maddeler genellikle çok az miktarda, çimento ağırlığının % 0,5-2'si arasında kullanılmakla kendilerinden beklenen etkiyi gösterirler. Örneğin şekerin % 0,5 oranında kullanılması priz başlama süresini 2,5 saat, priz sona erme süresini de 6 saat geciktirebilir. Priz geciktirici maddelerin kullanılması halinde beton 1 ve 2 günlük mukavemetlerinde büyük azalmalar meydana gelir. Böyle olmakla beraber, priz geciktirici kullanılarak üretilen betonların 28 ve 90 günlük mukavemetleri, katkısız betonların mukavemetlerinden daha büyük değerler alabilir. Priz geciktirici maddelerin kullanılması prizden evvelki rötreyi belirgin ölçüde artırır. Geciktiriciler aynı zamanda akışkanlaştırıcı fonksiyonunu da görürler. Ayrıca priz sırasında ısı yükselmesi azdır, ancak daha sonra toplam hidrasyon ısısında bir değişiklik olmaz [1, 2].

Priz geciktiriciler şu alanlarda aranılmaktadır [2]:

- Sıcak havalarda beton dökümü,
- İnşaat kesinti derzlerini azaltma,
- Transmikserle uzun mesafeye beton taşınması, hazır beton üretimi,
- Pompa betonu,
- Yüzeyi pürüzlendirilecek beton panoların üretimi.

2.2. Taze Betonun Reolojik Özelliklerini Değiştiren Katkı Maddeleri

Bu katkı maddeleri betonun reolojisini deformasyon yapma kabiliyetini artırıcı yönde değiştirir. Betonun reolojik özellikleri işlenebilme özellikleri olmaktadır. Bu katkı maddesini kullanmakla betonun işlenebilme özellikleri artar. Bu da betonun çok daha iyi bir şekilde kalıbına boşluk bırakmadan yerleşmesini ve kalıp içindeki donatıları devamlı bir şekilde sarmasını sağlar [1]. Plastifian veya plastikliği artıran bu katkı maddelerini su azaltıcı (akışkanlaştırıcı) ve su tutucu olmak üzere iki grup altında toplamak mümkündür [1, 2].

2.2.1. Su Azaltıcı (Akışkanlaştırıcı) Katkılar

Su azaltıcı bir madde kullanılması şu iki olanaktan birini sağlar [1]:

- Betonun aynı derecede bir işlenebilme özelliğine sahip olması daha az su kullanmak suretiyle elde edilir. Çünkü, bilindiği gibi su miktarının artırılması betonun işlenebilme özelliğini çok daha iyi bir duruma sokar. Bu itibarla, bu

katkı maddesi yardımıyla daha az su kullanarak istenilen işlenebilme özelliğinin elde edilmesi betonun mukavemetini artırır.

- Su miktarı azaltılmadan bu katkı maddesi kullanılırsa, betonun işlenebilme özelliğini önemli ölçüde artırmış oluruz.

Bu katkı maddelerinin esasını sıvıların yüzey gerilimini düşüren tensio-aktif elemanlar oluşturur. Bu tür maddeler çimento taneleri tarafından adsorbe edilerek bunların (-) ve (+) elektrikle yüklenmesini sağlar. Aynı elektrikle yüklü çimento tanelerinin birbirini itmesi ve böylelikle birbirinden uzaklaşması ile çimentonun su ile teması kolaylaşır. Bunun sonucunda hidrasyon hızlanır ve betonun akışkanlığı artar. Bu katkı maddesinin kullanılması su miktarını % 5-15 arasında azaltır [1, 2]. Bütün bu sonuçlar beton mukavemetinin büyük oranda artmasına neden olur. Bu gruba giren başlıca maddeler [1]:

- Lignosülfonik asit ve bunların tuzları
- Hidroksi karboksilik asit ve tuzları

Bu gruba giren katkı maddelerinin kullanılmasıyla taze betonun geçirimsizliği artar. Aynı zamanda bir miktar hava da ufak kabarcıklar halinde betonun içine sürüklenmiş olur. Böylelikle taze betondaki suyun dışarıya çıkması önlenmekle rötre azalır ve ayrıca donmaya daha dayanıklı bir beton elde edilir [1].

Son zamanlarda süper akışkanlaştırıcı denilen çok gelişmiş katkı maddeleri ortaya çıkmıştır. Kimyasal esaslı melamin formaldehit sülfonat kondensat veya naftalin formaldehit sülfonat kondensat olan bu maddeler aynı işlenebilme özelliği değeri için su miktarını büyük ölçüde azaltarak beton mukavemetinin çok yüksek değerler almasını sağlarlar. Su miktarını % 25-35 arasında azaltarak su/çimento oranının değerini 0,28'e kadar düşürerek mukavemeti 100 kgf/cm² olan betonları bu katkı maddesini kullanarak elde etmek mümkündür. Su miktarı azaltılmadan bu madde kullanılacak olursa işlenebilme özelliği veya betonun akıcılığı iki katına varan bir artış gösterebilir. Burada ilginç olan husus taze betonun akıcılığı büyük ölçüde artmış olmasına rağmen kohezyonunda bir azalma meydana gelmemesidir. Başka bir deyişle süper plastiklerin kullanılması betonun çözülmesine yol açmaz [1].

2.2.2. Su Tutucu Katkılar

Bunlar çimentonun su kusmasını, yani betonun terlemesini önleyen katkılardır. Bu bakımdan akışkanlaştırıcıların aksine karma suyunun bir miktar artmasına neden olurlar. Elde edilen betonun kohezyonu yüksektir, yani kararlı ve homojen yapıdadır [2].

Bu katkılar piyasaya toz veya sıvı halde sunulurlar. Tozları rutubetten korumak gerekir. Sıvılar uzun süre sonunda diplerine çökelti yaparlar. Kullanmadan önce bu çökeltilerin giderilmesi gerekir. Kullanılma oranları çimento ağırlığının % 2-3'ü mertebesindedir [2].

Bu katkıların etkileri daha ziyade fizikseldir. Mekanik mukavemeti bir miktar düşürürler, hidrolik rötreyi artırır. Betonların basınçlı su geçirimsizliği artmış olur, öte yandan kılcal su emmeleri de azalmıştır [2].

Bunların hammaddeleri aşağıda verilmiştir:

- Toz halindeki maddeler (ince fillerler): kieselguhr, bentonit, kolloidal kil, uçucu kül, yağlı kireç, öğütülmüş puzolanlar.
- Kolloidal maddeler: alginat, kazein.
- Polivinil asetat ve stearatlar.
- Sodyum abietat ve linyosülfonat gibi hava sürükleyiciler

2.3. Kimyasal ve Fiziksel Etkilere Dayanıklılığı Artıran Katkı Maddeleri

Fiziksel etkilerin en önemlisi sıcaklık değerinin sıfırın altına düşmesi sonunda meydana gelen donma olayıdır. Bu, betonun üretimini engellemekte ve parçalanmasına neden olmaktadır. Bu amaçla kullanılan katkı maddeleri suyun donma derecesini düşürmek suretiyle donma olayı meydana gelmeden çimentonun priz yapmasını sağlar [1, 2]. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki maddelerin kullanılması önerilir [1]:

- Na_2CO_3 veya K_2CO_3
- Lignosülfonat esaslı bir hava sürükleyici
- Üre

Gerek donma olayına karşı koymak ve gerekse betonu zararlı suların etkisinden korumak için kullanılan katkı maddelerine hidrofüj adı verilmektedir. Bu maddeleri yüzey hidrofüjleri ve kütle hidrofüjleri olarak iki gruba ayırmak mümkündür [1]. Hidrofüjlerin etkilerini şöylece sıralayabiliriz [2]:

- Kılcal su emme azalır.
- Priz zamanında gecikme yönünde değişim olur, eğer hızlandırıcı katılmışsa bu gecikme önlenir.
- Su tutuculuk özelliği gelişir.
- Mekanik dayanımlar bir miktar düşer
- Rötne artar

Bu maddeler toz veya sıvı halde bulunurlar ve çimento ağırlığının % 0,5-5'i oranında betona katılırlar [1, 2].

2.4. Katkı Maddelerini Kullanırken Alınacak Önlemler

Çimento ve betonların belirli bir özelliğini daha iyi bir duruma getirmek amacıyla kullanılan katkı maddeleri ile istenilen hedeflere ulaşılrken, diğler bazı özelliklerde iyiye doğru olmayan değışmeler olabilir. Böyle bir durumun meydana gelip gelmediğini anlamak için, belirli koşullar altında, katkı kullanarak ve kullanmayarak çimentolar üzerinde şu deneyler yapılmalıdır.

- a) Kıvam deneyi,
- b) Priz deneyleri,
- c) Hacim sabitliğı deneyi,
- d) Rötne deneyi,
- e) Hidratasyon ısısı deneyi,
- f) Mukavemet deneyleri.

Katkılı ve katkısız numunelerde yapılan bu deneylerde elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak kullanılan katkı maddesinin diğler özellikler üzerinde zararlı bir etki yapıp yapmadığı anlaşılır. Ancak böyle bir incelemede olumlu sonuç elde edildikten sonra o katkı maddesinin kullanılma yoluna gidilmelidir.

3. MİNERAL KATKILAR

Çimento gibi öğütölmüş toz halde silolarda depolanan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taş unu... vb. çeşitli maddelere 'Mineral Katkı' adı verilir. Mineral katkılar tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar. Ancak çimento ile birlikte kullanıldıklarında çimentoyla benzer görev yaparlar ve dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanır [3].

Puzolanlar doğal ya da yapay kökenli malzemelerdir. Bu malzemeler neredeyse hiç bağlayıcı özellik göstermez iken; ince ince ayrılmış formları nemli ortam varlığında ve normal sıcaklıkta, çimento esaslı bileşikleri oluşturmak amacıyla kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girebilir. Gerçekte puzolan ismi, şiddetli volkanik püskürmelerin zamanla camlaşması sonucu oluşan malzemelere verilen isimdir. Günümüzde ise, su varlığında kireç ile reaksiyona giren bütün malzemeleri tanımlamak için kullanılan bir jenerik ismi haline gelmiştir [3].

“Mineral katkılar” terimi, kaynaklarına bakılmaksızın, bütün puzolanik ve çimento bazlı malzemelerin tanımlanmasında kullanılır. Mineral katkıların kalsiyum hidroksit ile reaksiyon kabiliyeti, bu katkıların kompozisyonu, yapısı ve reaksiyon şartlarına bağımlıdır [3].

Çimento ve beton endüstrisinde kullanılan mineral katkılar değişik puzolanik karakterlere sahiptirler. Mineral katkıların mineral kompozisyonlarını temel alan puzolanik aktifliğini açıklamak için teorik altyapı literatürde mevcuttur [3]. Kimyasal reaksiyondaki girenler ile çıkanlar (ürünler) arasındaki serbest enerji farkı mineral katkıların puzolanik aktifliği için bir neden olabilir. Bir çok ülke, içerisine katkı eklenmiş çimentolar için standart şartnameler geliştirmiştir. Örneğin ASTM C595-81a [4] beş çeşit karıştırılmış hidrolik çimento tanımlamaktadır [3].

Mineral katkıların kompozisyonu ve yapısı, kaynaklarına göre geniş bir değişim göstermektedir. Çimento ve beton içerisinde kullanım için, ana bileşikler SiO_2 , Al_2O_3

ve Fe_2O_3 , toplam kompozisyonun en azından % 70'ini oluşturmaktadır. Bu katkıların aktifliği, amorf veya zayıf kristalli hallerdeki oksit ve mineral varlığına bağlıdır. Genel olarak, puzolanik reaksiyon bağıl olarak yavaş ilerler ve dolayısıyla hidrasyon ısı düşük olur [3].

Portland çimentosunun hidrasyonu süresince oluşan ürünlerden birisi $Ca(OH)_2$ 'dir. Bunun belirginliği çimentonun mineral kompozisyonu ve kürleşme süresine bağlı olarak değişir. Sertleşmiş harç ve betondaki $Ca(OH)_2$, pasta ve agrega arasındaki bağlanmış kısımlarda zayıflık oluşturur. Bu da harç ve betonun mukavemetinde azalma oluşmasına neden olur. Bununla birlikte $Ca(OH)_2$ varlığı, harç ve betonun deniz suyu veya sülfat çözeltisi gibi agresif çevre koşullarına dayanımını azaltır [3].

Portland çimentosunu yalnız olarak kullanmak, betonun durabilitesini garanti altına almak için yeterli olmayabilir. Bu yüzden, Portland çimentosuna mineral katkıları eklenebilir. Bunun sonucunda, belirli bir mekanik performans limitine ulaşmanın yanı sıra değerli hammaddeler ile enerjinin korunmasına da katkıda bulunulmuş olunur. Portland çimentosunu çeşitli mineral katkıları ile karıştırmanın sonucunda $Ca(OH)_2$ içeriği azaltılır ve bu da harç ve betonun agresif çevre koşullarındaki durabilitesini artırır. Son zamanlarda çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı - özellikle de yüksek puzolanik aktifliğe sahip olan mineral katkıları - kullanımında artışa şahit olmaktayız [3].

Genel olarak beton karışımını mineral katkılarıyla birleştirmek; betonun mukavemetini yükseltir, termik çatlamalara dayanımını artırır, permeabilitesini azaltmak suretiyle kimyasal etkilere karşı durabiliteyi geliştirir. Beton içerisindeki malzemelerden en pahalı olanı Portland çimentosudur. Buna karşın, mineral katkıların çoğu ise kullanımları için daha az enerji gerektiren endüstriyel ve doğal ürünlerdir. Portland çimentosunun bu katkılarla kısmi olarak yer değiştirilmesi sonucunda çimento ve betonun maliyetini düşüren önemli bir enerji tasarrufu elde edilir. Ayrıca Portland çimentosunun üretim prosesi esnasında çevreye büyük miktarlarda karbon oksit ve toz salınmaktadır. Bu faydalar, mineral katılardan çimento ve betonda yararlanılmasındaki artışı açıklamaktadır [3].

3.1. Mineral Katkıların Çimento ve Beton İçerisinde Kullanılması

Çimento ve beton endüstrisinde kullanılan mineral katkıları kökenlerine göre doğal ve yapay katkılar olarak ikiye ayırmak mümkündür.

3.1.1 Doğal Mineral Katkılar

Doğal mineral katkıları uzun bir süreden beri çimento ve beton içerisinde kullanılmaktadır. Bu katkılardan volkanik kül, tras ve zeolit gibi bazıları puzolanik aktiflik göstermelerine karşın, kimyasal ve mineral bileşimleri, oluşum kaynakları ve şartlarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedirler. Bu mineral katkıları baskın olarak silika ve ek olarak da alüminyum ve ferrik oksit bileşenlerinden oluşmaktadır [3].

Genel olarak doğal mineral katkıların kullanılmasının etkilerini aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz [3]:

- Çimento ve beton maliyetlerinde belirgin bir düşüş elde etmek.
- Enerji ve değerli hammadde israfının önüne geçmek.
- Çevrenin korunmasına destek olmak.
- Sertleşme esnasında açığa çıkan hidrasyon ısını azaltmak.
- Oturma zamanlarını geciktirmek.
- Kullanılan çeşit ve içeriğe bağlı olarak çimento ve betonun kıvamını modifiye etmek.
- Permeabiliteyi arttırmak suretiyle, deniz suyu gibi agresif çevre koşullarına karşı harç ve betonun durabilitesini arttırmak.
- Alkali-silika reaksiyonlarını azaltmak.

3.1.2 Yapay Mineral Katkılar

Çimento ve beton içerisine katılan mineral katkıların doğal kaynaklarındaki hızlı tükenmeden dolayı günümüzde yapay mineral katkıları kullanılmaktadır. Bilim ve teknolojiye ilerlemelerle beraber yüksek puzolanik aktiflik gösteren yapay mineral katkıları geliştirilmiştir [3].

Birçok farklı ülkede kullanılan yapay mineral katkıların ilkleri yüksek fırın cürufu ve uçucu kül idi. Son zamanlarda bunlara ek olarak silis dumanı ve metakaolin gibi etkili mineral katkıları çimento ve beton endüstrisine sunulmuştur. Cüruf ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların çimentoya karıştırılmasındaki başarı, maliyetlerin

düşürülmesi ve harç ve betonun davranışındaki bazı iyileştirmelerden kaynaklanmaktadır. Mineral katkıların kimyasal ve mineral bileşimleri, katkıların kaynaklarına ve formasyonları esnasındaki ortam şartlarına bağlı olarak değişmektedir.

Çimento ve betonda kullanılan cüruf temelde yüksek fırın cürufudur. Yüksek fırın cürufunun ana ögeleri SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve MgO 'dur. Bununla birlikte ikincil ögeler ise Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , MnO , S, P, P_2O_5 , Cl ve F'dir. Bunlar aşağıdaki oranlarda bulunurlar [3]:

SiO_2 = % 27-40

Al_2O_3 = % 5-33

CaO = % 30-50

MgO = % 1-21

Cüruflar; kimyasal bileşimleri, başlangıç soğuma sıcaklıkları ve soğutulma metodlarına dayalı olan kristal ve cam fazlarından oluşurlar. Cürufun kristal fazları melilit, gelenit veya okermanit, mernitit ve henitit'tir. cam fazı kristal faza kıyasla daha yüksek reaktifliktedir. Puzolanik aktiflik genel olarak; çözünebilir SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği, yapı, CaO içeriği ve cürufun partiküllerin boyut dağılımı ve yüzey alanı ile saptanır [3].

Uçucu kül de cüruf gibi çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı olarak sıklıkla kullanılan bir endüstriyel atık çeşididir. Uçucu külün yüksek cam oranı içeren çeşitleri Portland çimentosuna karıştırılmada kullanılır [5]. Uçucu kül içerisindeki cam içeriği; yanma sıcaklığı, kömürün kaynağı ve soğutma oranına bağlı olarak değişir. Normal ve yüksek kalsiyumlu uçucu kül, yüksek fırın cürufuna kıyasla CaO ve MgO içeriği daha fakir, SiO_2 içeriği daha zengin bir malzemedir. Uçucu külün ana kimyasal bileşikleri - değişen oranlarda olmakla beraber - SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 ve MgO 'dur. Uçucu kül, kömürün yakıt olarak kullanıldığı elektrik santrallerindeki cüruf ve uçucu külden oluşan atık karışımının ana bileşenini oluşturmaktadır. Uçucu kül içerisindeki yanmamış karbon miktarı esas olarak yanma metoduna dayanır. Uçucu kül-cüruf karışımında, uçucu külün puzolanik aktifliği cürufunkine kıyasla daha düşüktür [3].

Silis dumanı, çok ince silis partiküllerinden oluşan yüksek reaktifliğe sahip bir mineral katkıdır [3] ve silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin indirgenmesi sonucu elde edilir. Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden meydana gelir [6]. Silis dumanının ana bileşeni (genellikle % 80'den fazlasını oluşturur) SiO_2 'dir. Silis dumanının parçacıklarının ortalama tane boyutu 0,1 μm civarındadır [3, 6].

Günümüzde silis dumanı ve metakaolin gibi çok çeşitli yüksek reaktiflikte mineral katkı çimento bazlı kompozit malzemeler içerisinde kullanılmaktadır. Bu mineral katkıların çimento ve beton performansı üzerine etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma yapılmıştır ve yapılmaktadır. Bu mineral katkıları normal ve yüksek performanslı betonlar içerisinde yalnız olarak kullanıldıkları gibi, cüruf ve uçucu kül gibi geleneksel mineral katkıları ile birlikte de kullanılmaktadırlar. Geleneksel mineral katkıları çimento ve beton endüstrisinde daha baskın rol oynamaktadırlar. Maksimum karıştırılma yüzdeleri ulusal ve uluslararası standartlarda farklılık göstermektedir. Örneğin bu oran İngiltere'de % 65, Japonya'da % 70, Almanya ve Rusya'da ise % 80'dir [3].

Çimento ve beton içerisine cüruf eklenmesi sonucunda malzeme özelliklerinde elde edilen iyileştirmeleri inceleyen çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, cürufun reaktifliği çok değişkendir ve fazla yüksek değildir. Biraz önce belirtilen yüksek karıştırılma oranlarının etkisiyle, içerisine mineral katkı eklenmiş olan Portland çimentolu harç ve betonların karakteristik özellikleri bu cüruflardan kuvvetli bir şekilde etkilenebilir. Portland çimentosu içerisine yüksek fırın cürufu eklenmesi neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilir [3];

- Çimento ve beton maliyetinde düşüş
- Hidratasyon ısısındaki azalmaya bağlı olarak sertleşme aşamasında daha düşük termal gerilmeler
- Oturma zamanlarında gecikme
- Daha düşük su geçirgenliği
- Deniz suyu ve sodyumca zengin koşullarda daha iyi performans
- Korozyona karşı daha iyi dayanım
- Enerji ve hammadde tasarrufu

- Çevre korunmasına yardımcı olmak

Uçucu kül, daha düşük puzolanik aktifliğe sahip olmasına rağmen, dünya çapında çok büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Uçucu kül, beton içerisine aşağıdaki yollardan birisiyle eklenebilir [3];

- Portland çimentosunun bir kısmıyla yer değiştirilerek
- Beton içerisinde ek madde olarak kullanılarak
- Beton içerisindeki ince agrega ile yer değiştirilerek

Çimento ve beton içerisindeki uçucu külün betonun taze ve sertleşmiş hallerini etkilediği bilinmektedir. Bu etkileri aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz [7].

- Su ihtiyacı daha düşüktür.
- Segregasyon ve hidrasyon ısı azalır.
- Çimento ve betonun erken yaştaki mukavemet değerleri daha düşüktür.
- İleri yaştaki harç ve betonun mukavemet değerleri daha yüksektir.
- Harç ve betonun tuz ve sülfat çözeltileri içerisindeki durabiliteleri daha gelişmiştir.
- Yüksek karbon içeriğine bağlı olarak daha yüksek korozyon riskleri vardır.
- Enerji ve hammaddeden tasarruf sağlanır.
- Ekonomik ve ekolojik faydalar elde edilir.

Silis dumanı çimento ve beton endüstrisinde kullanılan en reaktif puzolanik malzemelerden birisidir. Silis dumanı eklenmesine bağlı olarak elde edilen önemli etkiler aşağıdadır [3];

- Çimento ile optimum yer değiştirilmesi sonucunda, erken ve ileri yaştaki harç ve betonlarda daha yüksek mukavemet değerleri elde edilir.
- Hidrasyon ısı azalır.
- Çimento pastası ve pasta ile agrega ara yüzeyinin boşluk miktarını azaltır. Böylece harç ve betondaki pasta-agrega ara yüzeyi bağları daha yüksek mukavemet değerleri oluşturacak şekilde geliştirilmiş olur.
- Daha düşük difüzyon katsayısı elde edilir. Bu da kuruma hızlarında düşüşe neden olur.
- Betonun su geçirimsizliği azalır.
- Harç ve betonun sülfat dayanımını artırır.

- Agreganın alkali-silika reaksiyonları riskini dűşürerek betonun korozyon riskini azaltır.

Bununla birlikte, silis dumanı eklenmiş Portland çimentosunun normal kıvamı yüksek eklenme yüzdelerinde çok ani artışlar gösterir. Yüksek su ihtiyacı düşük mukavemet değerlerine yol açabilir. Bundan dolayı, silis dumanını bir süperakışkanlaştırıcı ile birlikte kullanmak daha faydalı olacaktır [3].

4. METAKAOLİN

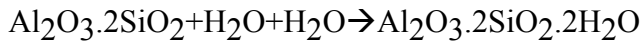
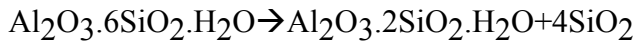
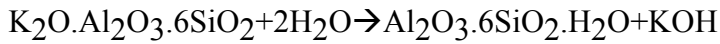
4.1. Kaolin

Kaolin; feldspat ve kil minerallerin doğal olarak ayrıştırılması sonucunda meydana gelen, yumuşak ve beyaz, kilsli bir malzemedir. Tabiatta sıklıkla karşılaşılan bu madde genellikle kağıt ve tekstil imalatlarında ve porselen üretiminde kullanılır [8].

Kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral Kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) olup alüminyum hidro silikat bileşimli bir kil mineralidir. Kaolin terimi altında çeşitli jenetik modellerle oluşmuş kaolin türleri ve kaolinitik killer yer almaktadır [8].

Kristal yapılarına göre yapılan kil sınıflandırmalarında, eş boyutlu ve bir yönde uzamış olanlar Kaolinit grubu olarak diğerlerinden ayrılmaktadır [8].

Oluşum itibariyle, feldspat içeren granitik veya volkanik kayaların feldspatlarının altere olarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. Ana kayaç içindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünür tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu Al_2O_3 içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç kaoliniti oluşturur [8].



Kaolinit

Bu oluşum modeline göre altere olan ana kayacın taşınmadan yerinde kalması sonucu kaolinit yatakları oluşur. Ana kayaların bozunma öncesi taşınıp, taşındıktan sonra depolanması veya bozunma sonucu taşınıp sedimanter yataklarda depolanması sonucu kaolinit bileşimli kil yatakları oluşur. Bu birliktelik literatürde kavram kargaşası yaratmakta olup, bunu verilen sınıflamalarda görmek mümkündür. Kaolin, granitten yüksek basınçlı su fişkırtılması sonucunda elde edilir. Daha sonra bu kaolin standart mineral proses teknikleri kullanılarak yoğunlaştırılır ve saflaştırılır. Elde

edilen kaolinin kurutulması neticesinde saflığı yüksek endüstriyel kaolin elde edilir [8].

4.2. Metakaolin

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin belirli bir sıcaklık aralığında yakılması ve sonrasında yüksek inceliğe sahip olması amacıyla öğütülmesi sonucu elde edilen bir reaktif alümino-silikat puzolanıdır [3].

Kaolinit minerali, seramik yapımında ısıtıldığında 200°C'nin altında higroskopik suyunu bırakır. 500-600°C'de kimyasal formüldeki bağıl suyunu bırakarak metakaolinite dönüşür. Bu oluşan madde metakaolinin temel ögesini oluşturur [8].



Yüksek sıcaklıklarda (> 900 °C), metakaolin kristalli bileşikler oluşturmak üzere çok çeşitli reaksiyonlara uğrar. Sonuçta serbest silika oluşur [9].

Metakaolin ilk olarak 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı için hazırlanan betonda kullanılmıştır [9].

Metakaolin, hidrat oluşturulması amacıyla kalsiyum hidroksit ile birleştirilebilir. Bu da harç ve betonun özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunur. Metakaolinin reaksiyon kapasitesi, temel olarak mineral içeriğine, ham kaolin kaynağına ve üretim şartlarına bağlıdır [3].

Metakaolin kalsiyum hidroksiti çok hızlı bir şekilde tüketir. Bu yüzden 1980'lerde metakaolinin çimento matrislerinde kullanılarak cam elyaf ve lifle takviye edilmiş bileşikler oluşturmasına yönelik bir çok araştırma yapılmıştır. 1990'larda ise metakaolinin betonda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu esnada yapılan araştırmalar sonucunda betonun bir çok özelliğinin iyileştiği gözlemlenmiştir [9].

4.2.1. Metakaolinin kimyasal bileşimi

Kimyasal olarak metakaolinin temel bileşenleri SiO₂ ve Al₂O₃ tür. Bununla birlikte Fe₂O₃, TiO₂, Na₂O ve K₂O da az miktarlarda bulunur. Metakaolinin mineral katkı olarak çimento ve beton içerisinde kullanılması sonucu çimento ve betona

sağlayacağı faydalar daha çok SiO₂ ve Al₂O₃ içeriğine bağlıdır ve paralellik gösterir [3].

Ticari amaçla kullanılan metakaolin Al₂O₃.2SiO₂ (metakaolinit) ve amorf veya az kristalli formdaki SiO₂ gibi aktif bileşikler içermektedir. Ancak, kaolin ve kaolinit killerinin suyunu tamamen kaybetmiş halleri tartışma konusu olmuştur. Eskiden, metakaolinin amorf alüminyum ve silika oksitlerinin karışımından meydana geldiği düşünülmektedir. Daha sonraları ise metakaolinin, kaolinitin bazı bünyesel özelliklerini açığa vurduğu kanıtlandı. Bu günlerde ise araştırmacıların çoğunluğu, metakaolinin amorf ve az kristalli formdaki metakaolinitten oluştuğu fikrine katılmaktadır [3].

4.2.2. Çimento ve Beton İçerisinde Metakaolin

Beton ve harcın dayanım özellikleri, malzemenin boşluk karakteri ile hidrasyon ürünlerinin türü, şekli, büyüklüğü ve dağılımıyla doğrudan etkileşim halindedir. Bugüne kadar, puzolanik aktiviteye dikkat çeken reaksiyon mekanizması ile Portland çimentosu ve betona metakaolin eklenmesi sonucu bu malzemelerde meydana gelen değişikliklerin incelendiği bir çok yayın yapılmıştır. Metakaolinin Portland çimentosunun bir kısmının yerine kullanılması sonucu elde edilen betonlar ilk olarak 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı'nın inşaatında kullanılmıştır. Bu kullanımdaki amaç betonun durabilitesinin artırılması idi. Bu tarihten sonra metakaolinin çimento ve beton içerisinde kullanımında belirgin bir artış olmuştur. Bugün gelinen noktada ise, metakaolinin Portland çimentosu ve normal beton içerisinde kullanımına ek olarak, yüksek performanslı beton ve harç içerisinde de kullanımı mevcuttur. Metakaolin ile ilgili yapılan araştırmaların önemli bir kısmı betonda kullanılması uygun olan optimum metakaolin miktarının belirlenmesine yöneliktir. Metakaolinin Portland çimentosu ile yer değiştirilerek kullanılması ve betona değişik oranlarda eklenen metakaolinin beton özelliklerine etkisi günümüzde de araştırılmaya devam etmektedir. Bu çalışmalara ek olarak, metakaolinin C₃S ile kullanım kombinasyonlarındaki reaktiflik kabiliyeti de deneysel olarak incelenmektedir. Bu ve benzeri çalışmalar harç ve beton içerisinde metakaolinin uygulaması hakkındaki genel bilgileri arttırmıştır. Metakaolinin varlığı, taze ve sertleşmiş harç ile beton özelliklerinden çoğunu etkilemektedir [3, 9].

4.2.2.1. Metakaolinin Varlığının Taze Haldeki Etkileri

Metakaolin çimentonun normal kıvamını yükseltir. Bu etkisi metakaolinin kökeni ve inceliğine bağlıdır. Metakaolin çeşitlerindeki kalsinasyon sıcaklık ve sürelerindeki farklılık, metakaolin karıştırılmış çimento harçlarındaki normal kıvamların farklılaşmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, beton içerisindeki metakaolinin varlığı su ihtiyacını artırır, ancak harç ve beton içerisinde oluşabilecek agrega segregasyonu riskini arttırmaz. Bununla birlikte betona çimento yerine bir miktar metakaolin eklenmesi sonucunda betonun yayılımında gözlenen azalma aynı miktar silis dumanının çimentoyla yer değiştirilmesi sonucu gözlemlenen azalmadan daha azdır. Metakaolinin harç ve betondaki su ihtiyacına olan etkisi, aynı miktar metakaolin içeren Portland çimento pastasındaki su ihtiyacına etkisinden daha azdır [3].

Metakaolin eklenmiş çimento ve betonun oturma zamanları hakkında bir çok çalışma yapılmıştır [3, 10]. Bu çalışmalarda, oturma zamanı üzerine metakaolinin kaynağı, inceliği ve kompozisyonu gibi faktörlerin etkisi tartışılmıştır. Bununla birlikte, bazı raporlarda sunulan data hala farklılık göstermektedir. Örneğin; Ambroise, Maximilien ve Pera, Portland çimentosunun metakaolin ile % 30'a kadar yer değiştirilmesinin ilk ve son oturma zamanlarını düşürdüğünü göstermişlerdir [10]. Bu sınır değer üzerindeki yüzdelerde metakaolin karıştırılmış pastaların oturma zamanları ise tedricen artar [10]. Buna karşın, çimento pastasındaki Portland çimentosunun termal olarak aktifleştirilmiş kaolinit kili ile yer değiştirmesi, ilk ve son oturma zamanlarını uzatmaktadır. Metakaolin içeren yüksek dayanımlı betonlar için artan oturma zamanları bulunmuştur. Ancak bu artış seviyeleri Portland çimentosu ile metakaolinin yer değiştirilme oranlarıyla doğrusallık göstermemiştir [3].

4.2.2.2. Metakaolin Varlığının İleri Yaştaki Etkileri

Metakaolin eklenmesinin ileri yaştaki pasta, harç ve betonun, dayanım ve durabilite gibi ana özellikleri üzerinde etkileri vardır. Dayanım, çimento ve betonun en temel özelliklerinden birisidir. Çimento ve betonun dayanımını arttırmak için gerekli olan optimum çimento-metakaolin yer değiştirme seviyesiyle ilgili literatürde çok sayıda çalışma vardır. Genel olarak, bu optimum seviyenin pasta, harç ve beton için değiştiğini belirtebiliriz [3].

Literatürde yapılmış olan çalışmaların sonucunda çimento ve betona metakaolin eklenmesinin aşağıdaki değerleri yükselttiğini söyleyebiliriz;

- Eğilme ve basınç mukavemeti
- Yoğunluk
- Kimyasal dayanım
- Alkali-silika dayanımı

Bu olayların temelini oluşturan mekanizmalar ise şunlardır;

- Puzolanik reaksiyonları esas alan kimyasal dayanım
- Partikül doldurma özelliğini esas alan fiziksel dayanım

Metakaolin eklenmesi; Portland çimentosunun hidratasyon prosesine tesir eden yeni bağlayıcı bileşiklerin oluşumuna yol açar. Buna ek olarak metakaolin, sahip olduğu partikül boyut dağılımıyla Portland çimentosundan ayrılır. İkinci etkinin belirginliği, her iki malzemenin sahip olduğu partikül boyut dağılım fonksiyonları arasındaki aralığa bağlıdır. Bundan dolayı, mineral katkının inceliği Portland çimentosunun inceliğinden ne kadar fazlaysa malzemeye daha yüksek yoğunluk ve mukavemet kapasitesi vermekte, boşluk doldurucu özellik o kadar göze çarpmaktadır [3].

4.2.2.3. Metakaolin Karıştırılmış Pasta, Harç ve Betonların Yapıları

Metakaolinin pasta, harç ve betonun yapısı üzerine etkisini inceleyen bazı yayınlar yapılmıştır [3, 10]. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, ileri yaştaki yapıyı etkileyen ana faktörler şunlardır:

- Kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$ içeriği
- Puzolanik reaksiyon ürünleri
- Porozite ve boşluk ebadı dağılımı

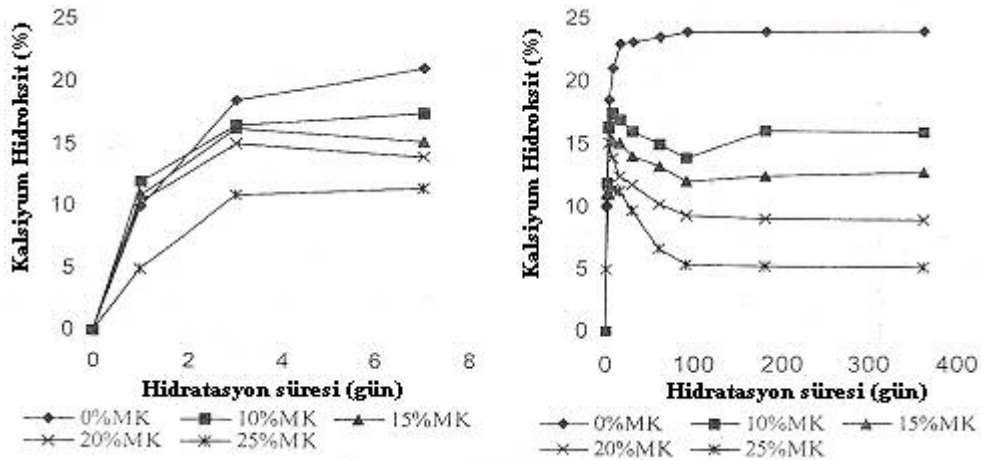
Bu faktörlerin bağıl önemleri değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte harç ve betonun durabilitesindeki iyileştirmeler bu faktörlerin birlikte etkisiyle meydana gelmektedir.

Metakaolinli pasta, harç ve betonun $Ca(OH)_2$ içeriği

Portland çimentosunun hidratasyon prosesi esnasında, Portland çimentosunun mineral kompozisyonuna bağlı olarak, ağırlıkça % 16-28 civarlarında $Ca(OH)_2$

oluşur. Portland çimentosunun kısmi olarak yer değiştirilmesi, doğru orantılı olarak kireç oluşumunu azaltır. Ayrıca metakaolin, puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak, pasta ve betondaki Ca(OH)_2 içeriğini azaltabilir. Bu Ca(OH)_2 'deki azalma, metakaolinin karakteristiği ve içeriğine bağlı olduğu kadar kür süresine de bağlıdır. Wild ve Khatib [11]'e göre metakaolin eklemiş pasta ve harçlardaki Ca(OH)_2 miktarının değişimi ile kür süresi arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır. % 15'e kadar metakaolin içeren pasta ve harçların, kontrol pastası ve harcıyla karşılaştırılması sonucu erken yaşlarda belirgin düşüklükte Ca(OH)_2 içerdiği gösterilmiştir. Bununla birlikte daha ileri yaşlarda, metakaolin içeren ve içermeyen pasta ve harçlarda bu fark daha belirgindir. Metakaolin karıştırılmış pasta ve harçlardaki minimum Ca(OH)_2 içeriği kürün 14. günü civarında bulunmuştur. % 15 metakaolin içeren Portland çimentosu pastasının bir yıllık kür süresinin ardından incelenmesi sonucunda, kontrol pastasının sadece % 50'si kadar Ca(OH)_2 içerdiği bulunmuştur [11].

Frias ve Cabrera [12] kalsiyum hidroksit zaman içerisindeki evrimini farklı metakaolin yer değiştirmeleri için kaydetmiştir. Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi, pasta içerisindeki Ca(OH)_2 içeriği, metakaolin oranı ve kür süresine bağlıdır. Bu metakaolin karıştırılmış pastaların Ca(OH)_2 içeriği ilk 3 günlük kür süresine kadar artmış, hemen ardından stabilize olmuş ve en sonunda da azalmıştır. Bu düşüş yaklaşık 100 gün kadar devam etmiştir. Bu olayların detayları yer değiştirme oranına dayanmaktadır [12].



Şekil 4.1. Kalsiyum hidroksit içeriği ile hidratasyon süresinin ilişkisi [12].

Oriol ve Pera [13], % 15 metakaolin içeren çimento pastalarının mikrodalga ile kürlenmesi sonucunda kireçten hiç bir eser kalmadığını kızılötesi spektroskopi yardımıyla kanıtlamıştır. Metakaolinin yer değiştirilme oranı, su / bağlayıcı oranı 0,5 olan 28 günlük pastalardaki benzer etkilerin farkına varabilmek için % 40'a çıkarılmıştır. Bu pastalar oda sıcaklığında kirece doymun koşullarda kürlenmiştir. Ca(OH)_2 'nin tamamen tüketilmesi için gerekli olan yer değiştirme oranı elbette metakaolinin saflığı ve Portland çimentosu tarafından üretilen Ca(OH)_2 'nin miktarına da bağlıdır. Bu son özellik, hem Portland çimentosunun bileşimi hem de su / bağlayıcı oranı ile yönetilmektedir [13].

Puzolanik reaksiyon ürünleri

Metakaolin beton karışımına eklendiği zaman, hidratasyon süresince meydana gelen ana kimyasal reaksiyonlar metakaolin ile Ca(OH)_2 'nin arasında gerçekleşecektir. Bu olay su varlığındaki çimento hidratasyonu sırasında gelişir. Kristalli kalsiyum alüminat hidratları ve alümino silikat hidratları (C_2ASH_8 , $\text{C}_3\text{AS}_3\text{H}_{2x}$, C_4AH_{13} , C_3AH_6) formundaki ürünler oluşur. Son bileşim, metakaolin / kalsiyum hidroksit oranı ve reaksiyon sıcaklığına bağlıdır [3].

Böyle yeni kristal ürünlerin puzolanik reaksiyonlar sonucunda oluşumu Ca(OH)_2 içeriğini azaltır ve pasta ile betonun yapısını, özellikle agrega ile matris arasındaki geçiş ara yüzünü geliştirir [3].

Porozite ve boşluk boyutu dağılımı

Portland çimentosunun metakaolin ile yer değiştirilmesi, pasta ve betondaki hem toplam poroziteyi hem de boşluk boyut dağılımını etkiler. Bu, metakaolinin puzolanik aktifliği ile metakaolin partiküllerinin pasta ve beton içerisindeki dispersiyon karakterlerinin sonucudur. Ambroise, Pera ve Maximilien [10] kısmi yer değiştirme oranının ağırlıkça % 50'ye yükseltilmesi sonucunda toplam porozitede önemli artış bulmuşlardır. % 30'luk metakaolin eklenmeye kadar pastaların toplam porozitesi sadece önemsiz derecede daha yüksektir. Daha spesifik olarak, ağırlıkça % 30 ve % 50 metakaolin içeren pastaların porozitesi 28 günde sırasıyla % 16,6 ve % 104,8 artmıştır (Tablo 4.1). Bu olayın ana sebebi metakaolin karıştırılmış çimentoların normal kıvamındaki hızlı yükselmedir. Bununla birlikte, pastaların aynı

su / bağlayıcı oranına sahip olduğu durumlarda daha yüksek toplam porozite bulunmuştur [12].

Tablo 4.1. Metakaolin eklenmiş çimentoların toplam porozitesi [10].

PÇ/MK (%)	S/B oranı	Farklı kür sürelerindeki (gün) toplam porozite (%)			
		28 (gün)	90 (gün)	180 (gün)	360 (gün)
100:0	0,25	14,4	12,3	12,8	11,0
90:10	0,28	15,3	14,3	14,2	14,1
80:20	0,34	13,8	13,0	12,9	12,6
70:30	0,39	16,8	15,7	15,2	15,0
60:40	0,44	25,0	21,6	16,8	16,4
50:50	0,54	29,5	29,0	28,0	28,0

PÇ: Portland çimentosu; MK: Metakaolin; S:Su; B=PÇ+MK.

Porozite zamanla azalmaktadır. Toplam porozitedeki azalmanın sade Portland çimentosunda en yüksek değerde olduğu bulunmuştur. Metakaolin eklenmiş karışımlarda ise, % 40 metakaolin içeren karışım hariç, bir yıllık sürenin sonunda elde edilen azalma miktarı Tablo 4.1’de de görüldüğü gibi % 10’un altındadır.

Metakaolin eklenmiş pastaların priz alması esnasında toplam porozitelerindeki değişim oldukça karmaşıktır. Bu özellik Frias ve Cabrer [12] tarafından yapılan çalışma sonucunda bulunmuştur. Bu çalışmada, 20 °C’de kürleştirilen, 0,55’lik sabit su / bağlayıcı oranı sahip ve metakaolinin ağırlıkça % 10 ile % 25 arasında değiştiği pastalar kullanılmıştır. Kürleşmenin ilk 24 saatinde bu pastaların toplam porozitesi sade pastanıniki ile benzer bulunmuştur. Daha sonra, bütün pastaların porozitesindeki düşüş hidratasyon süresi 28 güne doğru ilerledikçe devam etmiştir. 28 günden sonrasında ise porozitedeki azalma ihmal edilebilecek seviyede olmuştur. Metakaolin eklenmiş pastaların toplam porozitesindeki değişim, kür süresine bağlı olduğu gibi metakaolin içeriğine de bağlıdır [12]. Bu yüzden Portland çimentosu ile metakaolinin kısmi olarak yer değiştirilmesinin, pasta ve harçtaki toplam poroziteyi arttırdığı sonucu çıkarılabilir.

Metakaolinin eklenmesinin porozite üzerine ters etkilerini bildiren çalışmalar da literatürde bulunmaktadır [3]. Bu çalışmada ise kaolinit kilinden üretilen metakaolinin kullanıldığı pastalar vurgulanmaktadır. Yazarlara göre bu olay, boşluk

doldurucu etkinin puzolanik reaksiyon ile kombinasyonu sonucunda gerçekleşmiş olabilir. Bununla birlikte, ihtilafli gözükten sonuçların, kullanılan metakaolinin kaynağı ve karakteristik özelliklerinden ileri gelmesi de muhtemeldir.

Pasta içerisindeki metakaolin varlığı sadece toplam poroziteyi değil, aynı zamanda boşluk boyutu dağılımını da etkiler. Pasta içerisinde bulunan metakaolin miktarındaki artış daha küçük boşluklara yol açmaktadır. Dolayısıyla, metakaolin miktarındaki artış ile mikro-boşlukların (0,006-0,02 µm) miktarı artar ve daha büyük boşlukların (yarıçap>0,02 µm) oranı azalır. Boşluk refinasyonu ileri yaşlarda da meydana gelir. Bu refinasyon derecesi metakaolin oranına bağlı olarak değişir [12].

Sonuç olarak, pasta ve beton içerisinde metakaolin varlığı Ca(OH)₂ içeriğini düşürür. Metakaolin eklenmesi sonucunda toplam porozite biraz artmakla beraber boşluk yapısında refinasyona da yol açar. Bunun sonucunda malzeme agresif çevreye karşı daha stabil hale gelir [3].

4.2.2.4. Metakaolinin Harç ve Beton Durabilitesine Etkisi

Harç ve beton içerisinde gerçekleşen fiziksel ve kimyasal prosesler sonucunda malzemenin kalitesi düşer. Harç ve betondaki bozulmanın fiziksel sebepleri, yüzeysel aşınma ve çatlak oluşumudur. Kimyasal nedenlerle oluşan bozulma aşağıdaki sebeplerden dolayı oluşabilir [3]:

- Agresif akışkanlar ve sertleşmiş çimento pastası bileşenleri arasında gerçekleşen reaksiyonlar
- Sertleşmiş pasta bileşenlerinin hidrolizi ve leaçing
- Genişleyen ürünlerin oluşması

Bağlayıcı maddenin betonun durabilitesine etkisi büyüktür, çünkü betondaki bozulmaya yol açan faktörler genelde bağlayıcı tarafından yönetilmektedir [3].

Literatürde yapılan çalışmalardan metakaolinin Portland çimentosu ve beton durabilitesi üzerine etkilerinin kompozisyon, puzolanik aktiflik ve eklenme oranı gibi faktörlere dayandığı sonucu çıkarılabilir. Bunlardan sonuncuya gelince, elde edilen sonuçlar çimentonun metakaolin ile yer değiştirilmesinin harç ve beton durabilitesini arttırabileceği ispat etmektedir. Bu özellik temelde Ca(OH)₂ içeriğindeki azalma ve harç ile betondaki pastanın mikro-yapısının geliştirilmesine bağlıdır [3].

Ca(OH)_2 , agresif çözeltilerdeki pasta ve betonların durabilitesini etkileyen önemli bileşiklerdendir. Ca(OH)_2 'nin leaçing ile uzaklaştırılması, malzemeyi daha boşluklu hale getirerek permeabiliteyi yükseltebilir. Ca(OH)_2 ayrıca, etrenjit oluşumuna katılabilen jipsi oluşturmak üzere sülfat bileşikleriyle de reaksiyona girebilir. Bu, harç ve betonda genişlemeye yol açabilir. Etrenjit dispersiyonundaki heterojenlik ve ertelenmiş etrenjit oluşumuna bağlı olarak bu olay bozucu olabilir. Metakaolinin pasta ve betondaki varlığı, yüksek yer değiştirme oranlarında tamamlanan proseslerde, Ca(OH)_2 içeriğini ciddi miktarlarda azaltır. Sonuç olarak, agresif çevre içerisindeki pasta ve betonun dayanımı artar [3].

Metakaolin, boşluk refinasyonu ile, harç ve betonun boşluk yapısını kuvvetli bir şekilde etkileyerek zararlı maddelerin nakil ve difüzyon hızlarında belirgin bir düşüş meydana gelmesini sağlar. Betonda, agrega ile matris arasındaki geçiş ara yüzü, nakil özellikleri ile betonun durabilitesinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Buna göre, hidrasyon ürünlerinin (C-S-H, Ca(OH)_2) ince bir tabakası, taze haldeki agrega partiküllerinin üzerine çöker. Agregaya yüzlerinin yakın çevresindeki ara fazın mikro yapısının belirlenmesinde, çimento taneciklerinin agrega duvarını sarması olayı daha etkindir. Böylece, boyut segregasyonu, ince metakaolin partiküllerinin konsantrasyonunun agrega parçalarının yüzeyine yakın olmasına neden olur. Harç ve beton içerisine puzolanik mineral katkıların eklenmesi Ca(OH)_2 içeriğini düşürür. Bu da boşluk refinasyonunun daha etkili olmasını ve geçiş ara yüzündeki sarma yoğunluğunu artırır. Bu, çimento pastası ve agrega arasındaki bağın gücünü arttırmak suretiyle mikro-çatlak oluşumuna karşı dayanımı yükseltir. Bütün bu etkiler, Portland çimentosuna metakaolinin karıştırıldığı harç ve betonu daha yüksek durabilite değerlerine götürür [3].

Portland çimentosu içerisindeki C_3A içeriğinin, harç ve betonun kimyasal genişlemesi üzerine belirgin etkileri olduğu çok önceden kanıtlanmıştır. Buna rağmen, metakaolin karıştırılmış harçlardaki etkili C_3A seviyesi, metakaolin içeriğine kuvvetli bir şekilde bağlıdır. % 10'a kadar olan yer değiştirme oranlarında, metakaolin karıştırılmış harçlarındaki genişlemenin Portland çimentosu içerisindeki C_3A içeriği tarafından kontrol edilmektedir. Bu etki, daha yüksek yer değiştirme oranlarında (ağırlıkça % 15-25) düşmektedir. Bundan dolayı, genişleme riski metakaolin karıştırmaya bağlı olarak azaltılmakta ve bu da daha yüksek durabilitelere ulaştırmaktadır [3].

Literatürde yayınlanan deneyler, sülfat solüsyonları ve deniz suyuna karşı, betonda metakaolin eklenmeye dayanan bir dayanım artışının olduğunu göstermektedir. Metakaolin eklenmiş betonlarda oluşan genişlemenin, orta veya yüksek C₃A içeren Portland çimentosu kullanıldığı zaman, oldukça azaldığı belirlenmiştir. Bu, % 5'lik Na₂SO₄ çözeltisi içerisinde 520 gün bekletilen malzemedeki çatlak dayanımını yükseltmiştir. Yapılan çalışmalar, % 15'lik yer değiştirmenin, iyi bir sülfat dayanımı için minimum seviye olarak kabul edilebileceğini göstermektedir. Bunun altında yatan en büyük faktör uygun bir şekilde azaltılmış Ca(OH)₂ içeriğidir. Sonuçlar, düşük oksijen permeabilitesi ve klor penetrasyonu ölçümleri ile desteklenmiştir. Bütün pasta karışımlarına % 0,4-1 arasında klor eklendiği zaman; % 20'ye kadar metakaolin karıştırılmış pastanın boşluk solüsyonu içerisindeki klor iyonu konsantrasyonunun, aynı yaştaki kontrol pastasındakinden daha düşük olduğu örneklerle kanıtlanmıştır. Bu etki, OH⁻ konsantrasyonundaki azalmayı yok etmektedir. Sonuç olarak, sade ve metakaolin eklenmiş pastaların boşluk solüsyonundaki [Cl⁻]/[OH⁻] oranı, aynı dozda sodyum klorüre maruz bırakıldıklarında, benzer bulunmuştur. Aslında boşluk solüsyonundaki pH değerinin düşürülmesine rağmen metakaolin eklenmiş Portland çimentosu pastasının pH değeri 12,5'u aşmıştır. Bu nedenle, metakaolin oranı % 20'ye kadar olan betonların, çelik korozyonu riskinin oldukça az etkilendiği görülmüştür. Ağırlıkça % 10'a kadar olan metakaolin karıştırma oranlarında üretilen betonların, mineral ve organik asitlere direncinde anlamlı bir yükselme bulunmuştur [3].

Alkali-silika reaksiyonları için gerekli bileşikler Ca(OH)₂, aktif silika ve sudur. Bu olayda aktif silika agregadan sağlanmaktadır. Metakaolinin varlığı, harç ve beton içerisindeki kalsiyum hidroksit konsantrasyonunu düşürerek, alkali silika reaksiyonlarını azaltmaktadır. Spesifik olarak, ağırlıkça % 10-15 metakaolin eklemesi sonucunda, betonda meydana gelen genişleme % 0,01'in altına indirilmiştir. Bununla birlikte, agresif koşullardaki metakaolin karıştırılmış harç ve betonların durabilitesinin, metakaolinin karakteristik özelliklerinden etkilenebileceği de belirtilmelidir [3].

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan çalışmanın birinci kısmında su/bağlayıcı oranı 0,35 ve 0,45 olan; metakaolinsiz, %8 ve %16 metakaolinli beton üretimi hedeflenmektedir. Çalışmanın ikinci kısmında ise aynı bileşimlerdeki betonların harçları ve bunlara ek olarak da aynı metakaolin oranlarında metakaolin yerine silis dumanı eklenmiş harçların üretilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla ilk olarak elek analizi, özgül ağırlık deneyleri yapılarak ilgili malzemelerin özellikleri belirlenmiştir. Ardından deneme üretimleri yapılarak kullanılacak katkı ve beton bileşimlerine karar verilmiştir.

5.1. Kullanılan Malzemeler

5.1.1 Agregası

Deneşlerde kullanılan ince ve kaba agreganın elek analizi ve özgül ağırlıkları belirlenmiş ve sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.1. Elek Analizi Sonuçları

Elek Boyutu (mm)	Elekten Geçen (%)			
	Kırma Taş I	Kırma Taş II	Kırma Kum	Kum
16	100	68	100	100
8	57	0	100	100
4	3	0	88	99
2	0	0	57	95
1	0	0	34	79
0,5	0	0	20	52
0,25	0	0	12	15
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,72	2,72	2,68	2,60

5.1.2. Çimento ve Mineral Katkılar

Deneyleerde kullanılan çimento Nuh Çimento tarafından üretilmiş olan CEM 1 kodlu PÇ 42.5 tipi torba çimentodur. Çimentonun özgül ağırlığı piknometre deneyi ile 3,12 g/cm³ olarak bulunmuştur. Silis dumanı Elker tarafından üretilmiş olan 940 U kodlu torba silis dumanıdır. Metakaolin ise PowerPozz tarafından tedarik edilmiştir. Kullanılan silis dumanının ve metakaolinin üretici firmalar tarafından beyan edilen özgül ağırlıkları da sırasıyla 2,2 ve 2,6 g/cm³ 'dir.

5.1.3. Kimyasal Katkı

Deneyleerde polikarboksilik eter esaslı YKS (Yapı Kimya Sanayi) Glenium 51 kullanılmıştır. Bu katkı, yeni nesil polikarboksil kökenli süper akışkanlaştırıcılar sınıfına girmektedir. Bu yeni nesil süper akışkanlaştırıcıların çimento taneciklerini dağıtmasında elektrostatik etkilerden daha çok sterik etkiler önemlidir. Glenium 51, uzun kenar zincirli karboksilik eter polimerlerinden oluşmaktadır. Ana polimer omurgasına bağlı eter zincirleri bu sterik etkiyi sağlamaktadır. Kullanılan katkının üretici firma tarafından beyan edilen teknik özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Glenium 51 Teknik Özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³) (20 ⁰ C)	1,07-1,012
Klor % (EN 480-10)	< 0,1
Toplam alkali miktarı (EN 480-12)	Max, 1
Renk	Amber
Homojenlik	Homojen
Kimyasal İçerik	Polikarboksilik Eter Zincirleri

5.2. Deney Bileşimleri

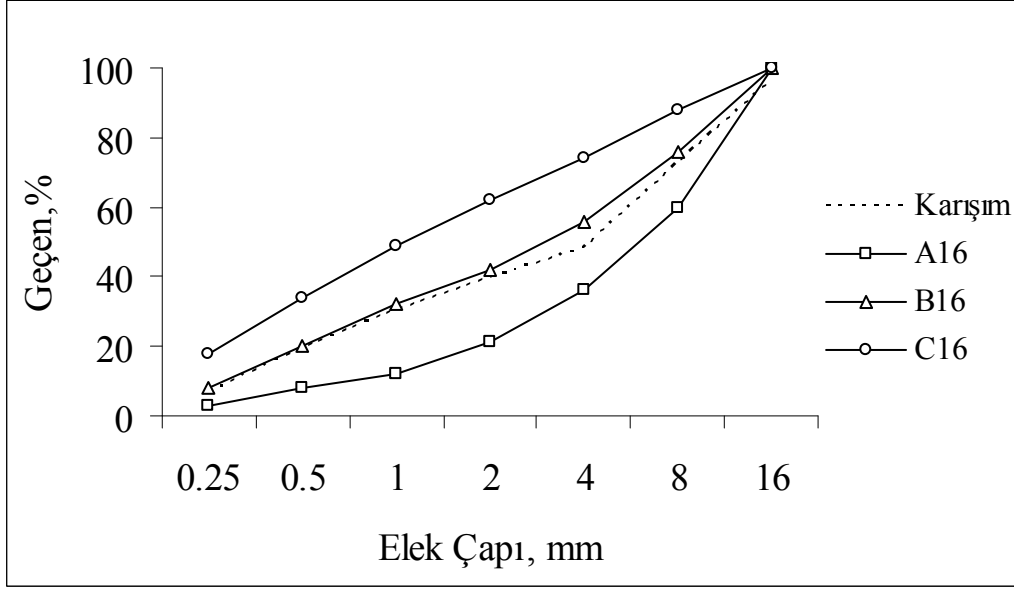
Yapılan elek analizleri (bkz. Şekil 5.1) göz önünde bulundurularak agrega bileşimleri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

Kırma Taş I - % 40

Kırma Taş II - % 10

Kum - % 30

Kırma Kum - % 20



Şekil 5.1. Granülometri Eğrisi

Su/bağlayıcı oranı 0,35 için katkı/bağlayıcı oranı 0,007 ve su/bağlayıcı oranı 0,45 için katkı/bağlayıcı oranı 0,0085 seçilerek üretilen deneme betonlarında elde edilen çökme ve yayılma değerleri yeterli görülerek aşağıdaki bileşimlerde karar kılınmıştır. Ancak üretim esnasında metakaolinin eklenmesinin kıvamı düşürdüğü görülmüş ve uygun çökme ve yayılma değerlerini elde edecek şekilde bir miktar katkı artırılmıştır. Su/bağlayıcı oranının 0,35 ve 0,45 olduğu 1m³ yerleşmiş beton için gerçek karışım miktarları sırasıyla Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te verilmiştir.

Su/bağlayıcı = 0,35 için;

- Çimento = 475 kg/m³
- Su/bağlayıcı = 0,35
- Katkı/bağlayıcı=0,007

Tablo 5.3. 1m³ yerleşmiş beton için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı = 0,35 için)

	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
Çimento (kg/m ³)	488	446	406
Metakaolin (kg/m ³)	-	38,8	77,4
Su (kg/m ³)	171	170	169
Katkı (kg/m ³)	3,39	4,64	3,36
Kırma Taş I (kg/m ³)	725	716	713
Kırma Taş II (kg/m ³)	181	179	178
Kum (kg/m ³)	520	513	511
Kırma Kum (kg/m ³)	357	353	351
Toplam (kg/m ³)	2446	2420	2410
Çökme (cm)	21	19	17
Yayılma Çapı (cm)	37	27	24

Su/bağlayıcı = 0,45 için;

- Çimento = 375 kg/m³
- Su/bağlayıcı = 0,45
- Katkı/bağlayıcı=0,0085

Tablo 5.4. 1m³ yerleşmiş beton için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı = 0,45 için)

	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
Çimento (kg/m ³)	387	351	320
Metakaolin (kg/m ³)	-	30,5	61
Su (kg/m ³)	174	172	172
Katkı (kg/m ³)	3,3	3,26	3,25
Kırma Taş I (kg/m ³)	761	749	745
Kırma Taş II (kg/m ³)	190	187	186
Kum (kg/m ³)	546	537	534
Kırma Kum (kg/m ³)	375	369	367
Toplam (kg/m ³)	2436	2398	2389
Çökme (cm)	24	18	20
Yayılma Çapı (cm)	44	24	27

Çalışmanın ikinci kısmında ise yukarıda bileşimleri verilen karışımların harçları ve bunlara ek olarak aynı metakaolin oranında metakaolin yerine silis dumanı eklenmiş harçlar üretilmiştir. Beton üretiminde de olduğu gibi harçların kıvamına göre katkı miktarları üretim esnasında değiştirilmiş ve Tablo 5.5 ve 5.6'de belirtilen harç bileşimlerine karar verilmiştir.

Tablo 5.5. 1m³ yerleşmiş harç için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı=0,35 için)

	Normal	% 8 metakaolin	% 16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
Çimento (kg/m ³)	725	672	607	665	610
Metakaolin (kg/m ³)	0	58,4	116	0	0
Silis Dumanı (kg/m ³)	0	0	0	57,9	116
Su (kg/m ³)	254	256	253	253	254
Katkı (kg/m ³)	4,2	5,2	5,8	5,3	5,5
Kum (kg/m ³)	771	773	763	762	761
Kırma Kum (kg/m ³)	530	531	524	524	523
Toplam (kg/m ³)	2282	2295	2267	2268	2270
Yayılma Çapı (mm)	14	16	14	15	15

Tablo 5.6. 1m³ yerleşmiş harç için gerçek karışım miktarları (su/bağlayıcı=0,45 için)

	Normal	% 8 metakaolin	% 16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
Çimento (kg/m ³)	587	545	493	542	493
Metakaolin (kg/m ³)	0	47,4	93,9	0	0
Silis Dumanı (kg/m ³)	0	0	0	47,1	93,8
Su (kg/m ³)	264	266	264	265	264
Katkı (kg/m ³)	1,7	3,0	3,8	2,5	3,8
Kum (kg/m ³)	828	832	823	825	817
Kırma Kum (kg/m ³)	569	572	565	567	562
Toplam (kg/m ³)	2249	2266	2242	2248	2233
Yayılma Çapı (mm)	14	15	15	14	15

5.3.Yapılan Deneyler

Betonda yapılan deneyler şunlardır:

- Çökme Deneyi
- Yayılma Deneyi
- Elastisite Modülü Deneyi
- Basınç Deneyi
- Yarma Deneyi
- Klor Geçirirmliliği Deneyi

Harçta yapılan deneyler ise şunlardır:

- Yayılma Deneyi
- Elektriksel Özdirenç Deneyi
- Eğilme Deneyi
- Basınç Deneyi

Tüm numuneler deney gününe kadar 20 ± 2 °C'deki kirece doymun su içerisinde bekletilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Bölüm 5’de belirtilen bileşimlerdeki üretimlerin hem taze hem de sertleşmiş beton ve harç deneyleri yapılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

6.1. Taze Beton ve Harç Deneyleri

Taze beton ve harç üzerinde çökme ve yayılma deneyleri yapıldı. Taze beton deneylerinde kullanılan huninin alt ve üst çapları sırasıyla 10 ve 20 cm ve yüksekliği de 30 cm’dir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.1, 6.2, 6.3 ve Tablo 6.4’te verilmektedir.

Tablo 6.1. Taze beton deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için)

	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
Çökme Değeri (cm)	21	19	17
Yayılma Çapı (cm)	37	27	24

Tablo 6.2. Taze beton deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için)

	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
Çökme Değeri (cm)	24	18	20
Yayılma Çapları (cm)	44	24	27

Tablo 6.3. Taze harç deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için)

	Normal	% 8 metakaolin	% 16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
Yayılma Çapları (cm)	14	16	14	15	15

Tablo 6.4. Taze harç deney sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için)

	Normal	% 8 metakaolin	% 16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
Yayılma Çapları (cm)	14	15	15	14	15

6.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton özellikleri üç kısımda incelenmiştir. İlk kısımda silindir numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda basınç dayanımı ile gerilme-şekil değiştirme ilişkisi elde edilmiştir. İkinci kısımda silindir numunelerin yarma mukavemeti tespit edilmiştir. Son kısımda ise silindir numunelerin klor geçirimsizliği ölçülmüştür.

6.2.1. Silindir basınç deneyleri

Deneylerde 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde standart silindirler numuneler kullanılmıştır. Her karışım için üçer tane numune hazırlanmıştır. Öncelikle her karışımdan birer numune üzerinde yapılan deneylerle birer numunenin 28 günlük basınç dayanımları saptanmıştır. Elde edilen bu ilk basınç dayanımlarının % 30-35'ine kadar yükleme yapılarak diğer numunelerin uzama miktarları ölçülmüştür. Bu uzama miktarları kullanılarak malzemelerin elastik davranış gösterdiği kısma ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisi elde edilmiştir.

Bu doğruların eğimleri hesaplanarak Tablo 6.5'te görülen her bir karışıma ait elastisite modülleri elde edilmiştir.

Tablo 6.5 Elastisite modülleri

	Su/bağlayıcı	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
Elastisite Modülü	0,35	32700	32400	34700
(MPa)	0,45	30800	30500	33300

Her iki su/bağlayıcı oranı için de metakaolinsiz ve % 8 metakaolin içeren betonların elastisite modülü değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte % 16 metakaolin içeren betonların elastisite modülü değerleri az da olsa daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Bu üçer numune üzerinde yapılan basınç deneyleri sonucunda elde edilen 28 günlük basınç dayanımları Tablo 6.6'da gösterilmiştir.

Tablo 6.6 28 günlük silindir numune basınç dayanımları

	Su/bağlayıcı	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
σ_{ort} (MPa)	0,35	76,9	79,3	81,2
	0,45	73,0	77,3	84,4

Tablo 6.6'da da görüldüğü gibi, betonun basınç dayanımı artan metakaolin miktarıyla paralel bir şekilde artmıştır. Su/bağlayıcı oranının 0,45 olduğu betonlar için metakaolinin miktarının % 8 ve % 16 olması durumunda basınç dayanımının da sırası ile % 6 ve % 16 arttığı görülmüştür. Benzer sonuçlar düşük su/bağlayıcı oranı için de elde edilmiştir.

6.2.2. Yarma deneyi

Deneyleerde 10 cm. çapında ve yaklaşık 5 cm. kalınlığında silindir numuneler kullanılmıştır. Her karışım için 5'er tane numune hazırlanmıştır.

Bu beşer numune üzerinde yapılan basınç deneyleri sonucunda elde edilen yarma basınç dayanımları Tablo 6.7'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde metakaolin içeriğinin değişmesi sonucunda yarma dayanımlarında belirgin bir değişiklik meydana gelmediği görülmüştür.

Tablo 6.7 Silindir numune yarma dayanımları

	Su/bağlayıcı	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
σ_{ort} (MPa)	0,35	7,26	7,30	7,78
	0,45	7,85	6,58	7,33

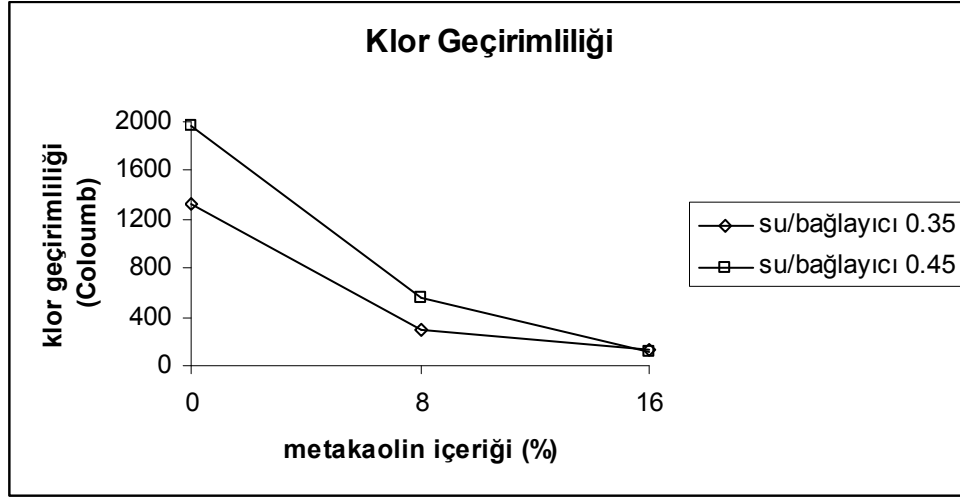
6.2.3. Klor geçirimliliği deneyi

Bu test betonun elektriksel iletkenliğini temel almaktadır. Deneyleerde 10 cm. çapında ve yaklaşık 5 cm. kalınlığında silindir numuneler kullanılmıştır. Her karışım için 3'er tane numune hazırlanmıştır.

Bu üçer numune üzerinde ASTM C 1202 [14] standardına göre yapılan klor geçirimliliği deneyleri sonucunda elde edilen değerler Tablo 6.8 ve Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.8 Klor geçirimliliği deneyi sonuçları

	Su/bağlayıcı	metakaolinsiz	% 8 metakaolinli	% 16 metakaolinli
Coloumb	0,35	1321,2	294,8	134,1
	0,45	1968,3	559,4	111,2



Şekil 6.1 Metakaolin içeriğinin betonun klor geçirirnililiğine etkisi

Tablo 6.8 ve Şekil 6.1’de belirtildiği gibi, metakaolin miktarının arttırılması ile klor geçirirnililiği değerlerinde büyük düşüşler gözlemlenmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0,45 olduğu betonlar için metakaolinin miktarının % 8 ve % 16 olması durumunda klor geçirirnililiği değerlerinin sırası ile metakaolinsiz beton numunesinin % 28 ve % 6’sı civarlarında olduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar düşük su/bağlayıcı oranı için de elde edilmiştir. % 16 metakaolin içeren karışımların klor geçirirnililiği değerleri ASTM C 1202 standardına göre ihmal edilebilir seviyededir. Klor geçirirnililiği test sonuçları betonun mikro yapısının bir göstergesidir. Düşük değerlerin elde edilmesi iyileştirilmiş boşluk yapısının ve düşük permeabilitenin bir göstergesidir. Düşük permeabiliteye sahip betonlar ile uzun servis ömürleri elde edilebilir.

6.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri

Sertleşmiş harç özellikleri üç kısımda incelenmiştir. İlk kısımda kiriş numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elektriksel özdirenç değerleri elde edilmiştir. İkinci kısımda kiriş numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda eğilme mukavemetleri ölçülmüştür. Son kısımda ise kiriş numunelerin basınç mukavemetleri tespit edilmiştir.

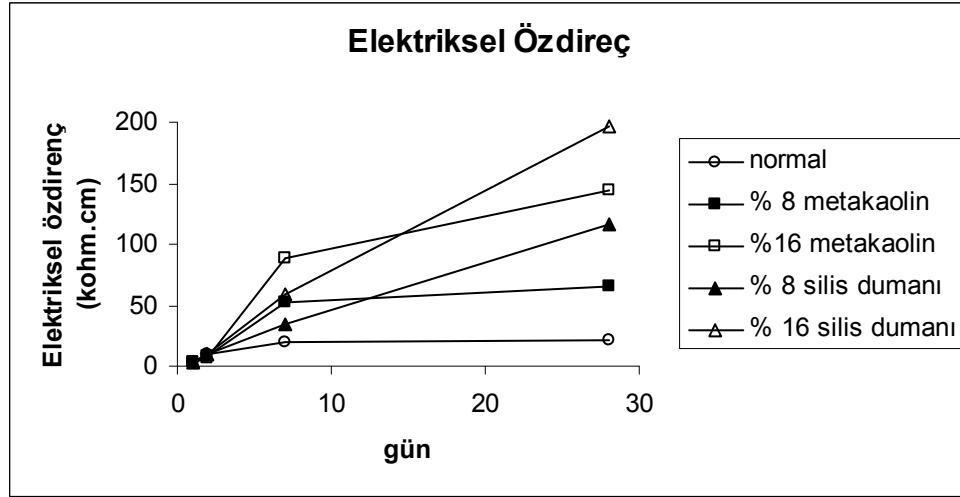
6.3.1. Elektriksel özdirenç deneyi

Üretilen numunelerin farklı günlerdeki elektriksel özdirenç değerleri 4 elektrotlu sistem ile (Wenner yöntemi) ölçüldü. Kullanılan cihazın elektrotları arası mesafesi 30 mm’dir. Elde edilen değerler Tablo 6.9 ve 6.10 ile Şekil 6.2 ve 6.3’te

gösterilmiştir. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi portland çimentosunun silis dumanı ve metakaolin ile yer değiştirilmesi sonucunda elektriksel özdirenç değerleri belirgin bir biçimde artmıştır.

Tablo 6.9. Elektriksel özdirenç değerleri (su/bağlayıcı = 0,35 için), (kohm.cm)

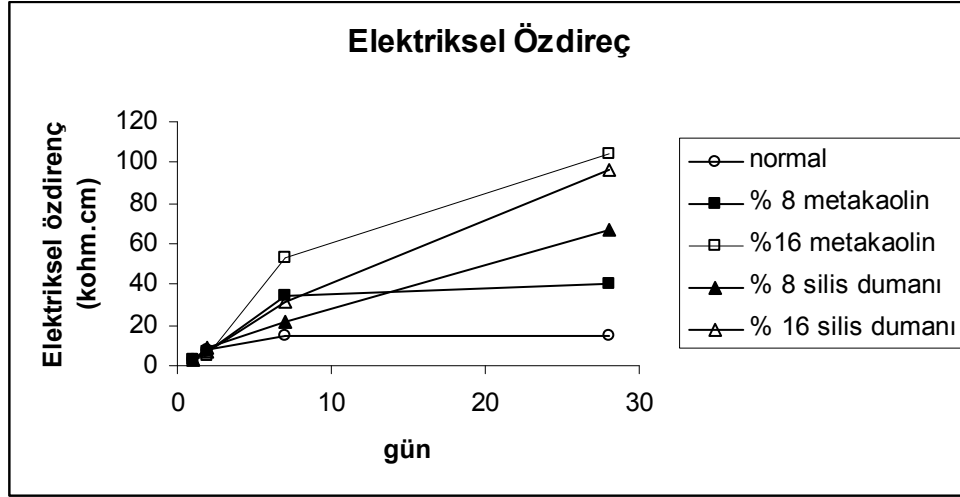
Gün	Normal	% 8 metakaolin	%16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
1	3,1	2,9	3,1	2,7	2,7
2	9,9	7,7	6,6	9,4	9,7
7	19,0	51,7	88,8	34,2	59,7
28	20,8	65,5	143,5	116,8	197,3



Şekil 6.2 Su/bağlayıcı oranı 0,35 için elektriksel özdirenç değerleri

Tablo 6.10. Elektriksel özdirenç değerleri (su/bağlayıcı = 0,45 için), (kohm.cm)

Gün	Normal	% 8 metakaolin	%16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
1	3,4	2,9	3,0	2,8	2,7
2	8,2	6,5	5,3	8,5	7,0
7	14,3	34,1	53,3	21,2	31,0
28	14,7	40,3	103,8	66,7	96,3



Şekil 6.3 Su/bağlayıcı oranı 0,45 için elektriksel özdirenc değerleri

6.3.2. Eğilme deneyi

4x4x15 mm ebatlarında üretilen üçer adet kiriş numuneleri üzerinde eğilme deneyleri yapılmıştır. İki noktadan aralığı 100 mm. olacak şekilde mesnetlenen numunelere orta noktalarından yük uygulanarak Tablo 6.11 ve 6.12’de gösterilen eğilme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, betona eklenen metakaolin ve silis dumanının harçların eğilme dayanımı üzerine önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Tablo 6.11. Eğilme deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için), (MPa)

Gün	Normal	% 8 metakaolin	%16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
2	4,68	5,17	4,05	4,31	3,91
7	5,75	5,95	5,78	6,08	5,63
28	5,87	6,59	6,24	6,75	6,41

Tablo 6.12. Eğilme deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için), (MPa)

Gün	Normal	% 8 metakaolin	%16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
2	3,82	3,62	2,01	3,10	3,28
7	4,48	4,56	5,04	5,52	5,12
28	5,95	5,29	5,95	5,75	5,64

6.3.3. Basınç deneyi

Eğilme deneyleri sonucunda kırılan numunelerden oluşan 6'şar parça üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır. Kesit alanı 40 mm x 40 mm olacak şekilde mesnetlenen numunelere orta noktalarından yük uygulanarak Tablo 6.13 ve 6.14'da gösterilen basınç değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 6.13. Basınç deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,35 için), (MPa)

Gün	Normal	% 8 metakaolin	%16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
2	53,1	48,3	45,0	48,8	44,3
7	67,3	73,3	73,2	72,3	69,1
28	78,4	85,9	83,1	75,0	78,2

Tablo 6.14. Basınç deneyi sonuçları (su/bağlayıcı = 0,45 için), (MPa)

Gün	Normal	% 8 metakaolin	%16 metakaolin	% 8 silis dumanı	% 16 silis dumanı
2	36,7	34,9	32,0	33,1	29,9
7	57,8	56,6	62,8	55,2	59,0
28	58,9	67,8	66,0	71,7	64,4

Elde edilen sonuçlar incelendiği zaman, her iki su/bağlayıcı oranı için de 2 günlük numunelerin basınç dayanımlarının artan silis dumanı veya metakaolin oranları için azalmakta olduğu görülmüştür. Örneğin su/bağlayıcı oranı 0,45 olan % 16 silis dumanı içeren harç numunesinin 2 günlük basınç dayanımı, kontrol numunesinin % 18'i kadar daha düşüktür. Buna karşın ilerleyen yaşlardaki metakaolin ve silis dumanı içeren harçların basınç dayanımları kontrol numunelerinin yaklaşık %10-20 daha fazlasıdır. Ayrıca % 8 metakaolin içeren harçların basınç dayanımlarının % 16 metakaolin içeren harçlardan daha yüksek olduğu görülmektedir.

6.4. Değerlendirme

Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçları aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz:

1. Portland çimentosunun metakaolin ile yer değiştirilmesi betonun basınç mukavemetini arttırmıştır. Yüksek su/bağlayıcı oranında bu artış miktarı % 15 civarındadır. Silis dumanı ve metakaolin kullanılarak üretilen harç karışımlarının

2 günlük basınç mukavemeti değerlerinin sadece portland çimentosu kullanılarak üretilen harçlar ile kıyaslandığında biraz düşük olduğu görülmüştür. Buna karşın, 28 günlük basınç mukavemetleri incelendiği zaman, metakaolin ve silis dumanı içeren harç karışımlarının basınç mukavemetlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

2. Metakaolinin beton içerisinde kullanılması klor geçirimsizliğini belirgin bir biçimde azaltmıştır. % 16 metakaolin içeren karışımların klor geçirimsizliği değerleri ASTM C 1202 standardına göre ihmal edilebilir seviyededir.
3. Portland çimentosunun metakaolin veya silis dumanı ile yer değiştirilmesi elektriksel özdirenç değerlerini belirgin bir biçimde arttırmıştır. Bu da betonun permeabilitesinin daha da düşürüldüğünün bir göstergesidir. Elektriksel özdirenç deney sonuçları klor geçirimsizliği deney sonuçları ile büyük bir uyum içerisindedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Postacıoğlu, B.**, 1986. Beton Cilt I Bağlayıcı Maddeler. Divanyolu, İstanbul.
- [2] **Akman, S.**, 1987. Yapı Malzemeleri. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [3] **VU, D.D.**, 2002. Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete. Delft University Press, Netherlands.
- [4] **ASTM C595**, 1981. Standart Specification for Blended Hydraulic Cements, Annual Book of ASTM standarts.
- [5] **Thomas, M.D.A., Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G.**, 1999. The use of fly ash in concrete: Classification by composition. Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 21, No. 2, pp. 105-110
- [6] **Yeğinobalı, A.**, 2002. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB, Ankara.
- [7] **Bijen, J.M.**, 1996. Benefits of slag and fly ash. Construction and Building Materials, Elsevier Science Ltd., UK, Vol. 10, pp. 309-314.
- [8] **Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Alt Maddeler Alt Komisyonu**, 1995. Seramik-Refrakter-Cam Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu Cilt I, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Yayın No: DPT : 2418 – ÖİK: 477.
- [9] **Pera, J.**, 2001. Metakaolin and calcined clays. Cement and Concrete Composites, Elsevier Science Ltd.
- [10] **Ambroise, J., Maximilien, S., Pera, J.**, 1993. Properties of metakaolin blended cements. Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, No. 1, pp.161-168
- [11] **Wild, S., Khatib, J.M.**, 1997. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 1, pp. 137-146.
- [12] **Frias, M., Cabrera, J.**, 2000. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 561-569.

- [13] **Oriol, M. And Pera, J.**, 1995. Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 265-270
- [14] **ASTM C 1202.**, 1997. Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Annual of ASTM Standards.

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf HAMALI 2004 yılında İTÜ İnşaat Mühendisliği, 2005 yılında da İTÜ Kimya Mühendisliği bölümlerinden mezun oldu (çift anadal programı). İTÜ Yapı Mühendisliği-Yapı Malzemesi üzerine 2004 yılında yüksek lisans programına başladı. 2006 yılından bu yana Superlit Boru San.A.S. bünyesinde çalışmaktadır.